

*Н.А.ТКАЧУК*, докт.техн.наук; *Е.А.ОФЛОВ*, НТУ «ХПИ»;  
*Л.С.ЛИПОВЕЦКИЙ*, Харьковский государственный сервисный центр  
«СТЭМ»; *А.Н.МАЛАКЕЙ*, ГП «Завод им. Малышева»

## **К ВОПРОСУ РАСЧЕТНО-ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОГО ИССЛЕДОВАНИЯ НАПРЯЖЕННО-ДЕФОРМИРОВАННОГО СОСТОЯНИЯ ЭЛЕМЕНТОВ СЛОЖНЫХ МЕХАНИЧЕСКИХ СИСТЕМ**

Запропоновано розвиток розрахунково-експериментального методу для дослідження напружено-деформованого стану елементів складних механічних систем. Описано схеми досліджень із застосуванням методу скінчених елементів та спекл-голографічної інтерферометрії.

Development of calculation-experimental method for research of stressed-deformed state of elements of complicated mechanical systems is presented. The charts of researches with application of method of finite elements and speckle-holographic interferometry are described.

### **1. Введение**

В процессе автоматизированного проектирования сложных машиностроительных конструкций возникают задачи обеспечения достоверности расчетных схем и моделей, применяемых для численного исследования напряженно-деформированного состояния их элементов. Применение расчетных схем в методе конечных элементов требует в качестве исходных данных знания: параметров конечно-элементной разбивки исследуемых объектов, граничных условий и нагрузок. Точность исходных данных обеспечивает высокую точность численных результатов. В последующем при использовании данных моделей в специализированных интегрированных системах автоматизированного анализа и синтеза элементов сложных механических систем обеспечивается и точность исследований, и высокие жесткостные и прочностные характеристики проектируемых изделий.

Существующие в настоящее время численные методы исследования напряженно-деформированного состояния, среди которых лидирующее положение занимает метод конечных элементов (МКЭ), не обеспечивают только за счет внутренних средств контроль точности результатов моделирования по сравнению с поведением реальных объектов. Актуальной становится задача обеспечения достоверности используемых расчетных схем при численном исследовании элементов сложных механических систем. В работе предлагается развитие расчетно-экспериментального метода (РЭМ) исследований, при использовании которого в качестве основного результата выступают достоверные и точные расчетные модели исследуемых элементов сложных механических систем (ЭСМС) [1-7].

## 2. Постановка задачи синтеза расчетных моделей на базе метода конечных элементов и метода голографической интерферометрии

Задачу исследования напряженно-деформированного состояния элементов сложных механических систем можно рассмотреть следующим образом. Пусть  $\mathbf{R}$  – реальный объект, поведение которого формально описывается при помощи в общем случае неизвестного оператора  $L_R$ :

$$L_R(u_R, P_R, f, t) = 0, \quad (1)$$

где  $u_R, P_R, f, t$  – переменные состояния, параметры, внешняя нагрузка и время соответственно. Математическую модель  $\mathbf{M}$ , получаемую в результате процесса идеализации  $I$ , описывает известный оператор  $L_M$ :

$$L_M(u_M, P_M, f, t) = 0, \quad (2)$$

где в скобках – переменные состояния, параметры, внешняя нагрузка и время соответственно. Численную модель  $\mathbf{N}$ , получаемую в результате процесса дискретизации  $D$ , описывает в каждом конкретном случае оператор  $L_N$ :

$$L_N(u_N, P_N, f, t) = 0. \quad (3)$$

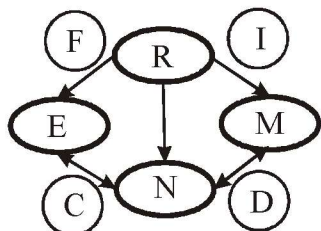
Индексы  $N$  в данном выражении соответствуют некоторой создаваемой численной модели исследуемого объекта и явления.

Численная модель подразумевает совокупность собственно дискретизированных уравнений, численных методов их решения, алгоритмов и программного обеспечения.

Если объект или его физическая модель (при физическом моделировании  $F$ ) подвергаются экспериментальному исследованию, то сам объект или его модель, метод исследований, измерительные схемы (регистрация, усиление, расшифровка, представление) и измерительная аппаратура образуют экспериментальную модель  $E$ , поведение которой в операторном виде можно записать следующим образом:

$$L_E(u_E, P_E, f, t) = 0. \quad (4)$$

Соотношения (1)-(4) описывают различные формы реального объекта и исследуемого явления (на рис. 1 приведена схема исследования). В схеме на рис. 1 процесс сравнения данных численных и экспериментальных исследований обозначен через  $C$ .



$\mathbf{R}$  – реальный объект;  
 $\mathbf{M}$  – математическая модель;  
 $\mathbf{N}$  – численная модель;  
 $\mathbf{E}$  – экспериментальная модель;  
 $\mathbf{F}$  – физическое моделирование;  
 $\mathbf{I}$  – идеализация;  
 $\mathbf{D}$  – дискретизация;  
 $\mathbf{C}$  – сравнение, верификация

Рисунок 1 – Общая схема соотношения этапов исследования элементов сложных механических систем

Ставится задача разработки математического аппарата для расчетно-экспериментального исследования напряженно-деформированного состояния элементов сложных механических систем в автоматизированном режиме.

### 3. Формализация задачи

При выборе метода экспериментального исследования для расчетно-экспериментального исследования напряженно-деформированного состояния элементов сложных механических систем в автоматизированном режиме предпочтение было отдано методу спекл-голографической интерферометрии (МСГИ), который является одним из наиболее точных и информативных методов исследований [8]. Как показывает практика, именно этап сравнения результатов численных и экспериментальных результатов, причем в автоматизированном режиме, разработан недостаточно: нет отработанных механизмов *сравнения полей*  $u_R$ ,  $u_M$ ,  $u_N$ ,  $u_E$ ; не производится *верификация* модели в части достоверности параметров  $P$ ,  $f$ ; не определяется *полнота* модели (полнота множества  $P$ ,  $f$ ); не проводится *рационализация* моделей (определение значимых факторов).

Исходя из предположений: этап **I** – достаточно корректен; этап **D** – в принципе в настоящее время развития технологии исследований – отработанный в литературе этап; этап **F** – при использовании МСГИ достаточно точен, требование соответствия результатов исследований **R**, **M**, **N**, **E** предполагает соответствие результатов в звене **C** (см. рис. 1).

В реальных случаях в силу того, что:

- этап **I** – недостаточно «полный», подробный;
- на этапе **F** присутствуют погрешности физического моделирования, измерений, расшифровки;
- на этапе **D** нельзя избежать погрешностей дискретизации (размеры и расположение сетки конечных элементов, типы КЭ, методы решения систем уравнений),

возникает несоответствие в конкретной цепочке **C**.

Поскольку в схеме на рис. 1 этап **I** – это аппарат механики деформированного твердого тела, достаточно разработанный для большей части спектра возникающих задач моделирования реакции сложных механических систем на различные типы воздействий; этап **M** – метод спекл-голографической интерферометрии, который дает интегральную точность измерения до долей микрона, в том числе на *реальном* объекте; этап **D** – МКЭ, который в *принципе* дает достаточно точное и полное описание любой сложности математической модели процесса в механических системах, то на первый взгляд ошибки в цепочках этапов **I-M-D** должны быть сведены (в принципе) к минимуму. Однако при этом узким местом является *обоснованный выбор* на различных этапах следующего:

- этап **D**: задание параметров дискретизации (то есть например, поиск минимально необходимой сетки, описывающей адекватный процесс в мате-

математической модели (сгущение и сравнение поведения решения при этом не всегда оправданно, так как применяемые конечные элементы, например, не дают возможности в полной мере описать тот или иной процесс));

- этап **I**: *определение значимых параметров* (в случае очень большого количества параметров  $P$  возникает вопрос их минимизации, то есть поиска необходимого (или оптимального, или рекомендуемого) набора параметров);

- этапы **I, D**: *степени полноты множества* (существенные параметры в модели могут быть проигнорированы (например: модель строится на основе Shell-элементов, а требуется – Solid; в модели использовано жесткое защемление, а требуется – упругое); отсюда возникает необходимость обоснованного *пополнения* набора параметров модели).

Сведя к минимуму погрешности в цепочке этапа **F** (физическое моделирование и измерение), а также обоснованно допустив возможность добиться структурного и параметрического изменения математической и численной модели таким образом, чтобы обеспечить адекватное описание  $R$ , исходную задачу можно представить в виде определения такой рациональной структуры и множества параметров значений  $P_N$ , чтобы с заданной точностью описать поведение реального объекта:

$$P_N^*, f_N^* : I(u_N - u_E) \leq \epsilon, \quad (5)$$

где  $I$  – некоторая мера, определяющая несоответствие результатов экспериментальных и численных исследований ( $\Delta u_{NE} = u_N - u_E$ ).

При этом можно выделить следующие типы задач:

- 1) Определение типа численных моделей и (или) характеристик конечно-элементных разбивок;
- 2) Определение величины, структуры, типов и (или) закона распределения нагрузок на ЭСМС;
- 3) Определение граничных условий и условий сопряжения;
- 4) Определение свойств материалов;
- 5) Определение значимых параметров моделей;
- 6) Определение полноты множества значимых параметров;
- 7) Определение минимального полного множества параметров;
- 8) Определение границ применимости моделей;
- 9) Определение чувствительности моделей к изменению параметров;
- 10) Определение зависимости характеристик модели (например, прочностных и жесткостных) от конструктивных или иных параметров модели во всем или в выделенном диапазоне изменения;
- 11) Построение «экспресс-моделей» (обоснованно структурно упрощенных на основе многовариантных исследований) и «экспресс-систем» оценки прочностных и жесткостных характеристик отдельных ЭСМС (аналитических зависимостей, графиков, таблиц, программных модулей или баз данных), в том числе для семейства объектов.

#### 4. Обобщение исходной постановки при разработке расчетно-экспериментального метода исследований

Исходная постановка задачи по сравнению с соотношениями (5) может быть расширена. В частности, возможны следующие обобщения предлагаемого подхода.

Для классов конструкций или для множеств моделей при исследовании напряженно-деформированного состояния элементов механических систем во многих случаях возникает проблема оценки достоверности результатов, получаемых при численном моделировании реакции исследуемых систем на различные виды воздействий. Чаще всего эта проблема разрешается сравнением полученных результатов с данными, полученными другим способом (численно, аналитически, экспериментально). Естественно, что данные, полученные в ходе экспериментальных исследований (при соблюдении определенных требований к условиям их проведения, а также характеристикам используемой регистрирующей и измерительной аппаратуры) представляют особый интерес, поскольку при этом могут проявиться такие свойства объекта, которые учитываются исходной математической моделью или не в полной мере, или вообще ею не учитываются. Анализ результатов экспериментальных исследований может также заставить изменить используемые при исследовании численные модели (например, при использовании метода конечных элементов – типы применяемых конечных элементов, их размеры, расположение зон сгущения-разрежения конечно-элементных сеток). Существенными являются и следующие факторы: характер зависимости напряженно-деформированного состояния от времени, степень влияния на него условий контактного сопряжения, параметров окружающей среды и т.д.

В связи с этим большое развитие в последнее время получили методы исследований прочностных и жесткостных характеристик элементов механических систем, сочетающие численные и экспериментальные этапы. Традиционный подход к расчетно-экспериментальным исследованиям (рис. 2) направленный на исследование конкретного объекта, параметра, эффекта, предполагает сопоставление результатов исследований «по горизонтали», то есть полученных для одного объекта каким-либо из численных методов (или несколькими) и каким-либо из экспериментальных методов (или несколькими).

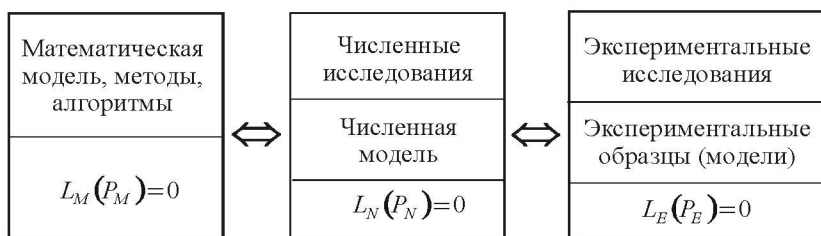


Рисунок 2 – Традиционная схема расчетно-экспериментальных исследований

Данный подход эффективен во многих случаях, когда поведение исследуемого объекта достаточно полно описывается одним или небольшим количеством определяющих параметров. Однако при исследовании реальных механических систем в большинстве случаев имеет место ситуация, когда в исследуемом объекте нельзя заранее выделить эти определяющие параметры. Машина или механизм, состоящие из единиц, десятков и сотен основных элементов, находящихся в десятках, сотнях и тысячах взаимосвязей между собой и с внешней средой, описываются достаточно сложной математической моделью.

При использовании традиционной схемы происходит сопоставление как параметров  $P_M$ ,  $P_N$ ,  $P_E$ , так и зависимостей между ними, описываемых  $L_M$ ,  $L_N$ ,  $L_E$ , и последующая корректировка моделей до получения удовлетворительного соответствия. Одновременно может производиться как обоснованное расширение, так и сужение набора определяющих параметров, усложнение или упрощение зависимостей между ними.

Предлагается новая схема организации исследований, в которой можно устанавливать взаимосвязь не только между параметрами  $P_M$ ,  $P_N$ ,  $P_E$ , и операторами  $L_M$ ,  $L_N$ ,  $L_E$ , а и между множествами тех и других (рис. 3).

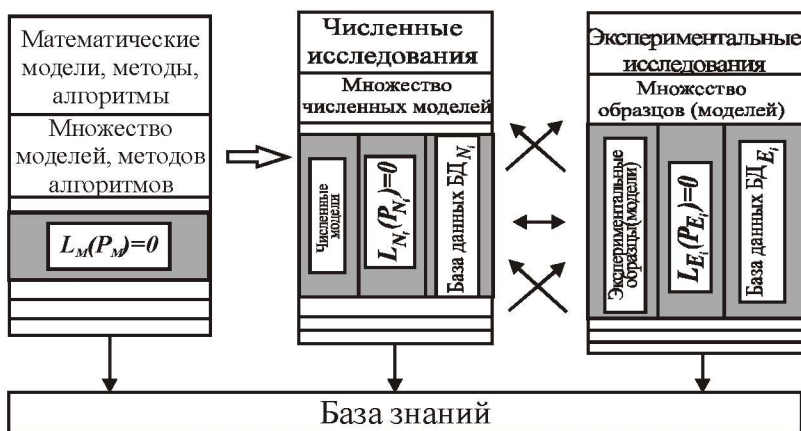


Рисунок 3 – Предлагаемая схема расчетно-экспериментальных исследований

Это позволяет использовать при организации баз данных, содержащих результаты численных и экспериментальных исследований, описывающих различные механические системы, проводимые в различное время различными исследователями с применением различной аппаратуры, различных численных методов, различных вычислительных методов и средств для установления искомых зависимостей. Более того, избыточность информации (которая имеет место в некоторых случаях) на самом деле не приводит к противоречиям, а служит дополнительным источником повышения достоверности результатов, степени адекватности моделей и точности методов. Причем сопос-

тавление результатов можно производить как между элементами множеств  $M$ ,  $N$  и  $E$  (математические модели, результаты численных и экспериментальных исследований, соответственно), так и внутри множеств, используя при этом различные весовые коэффициенты для выделения результатов более значимых исследований.

Получаемая в результате база знаний за счет постоянного пополнения множеств  $M$ ,  $N$  и  $E$  не только растет в объеме, но и повышает достоверность содержащихся в ней элементов знаний.

Естественно, что предложенная схема нуждается в определенной формализации. Отдельной крупной задачей является организация, создание и сопровождение баз данных хотя бы по отдельным классам объектов, по тем или иным областям. Кроме того, еще одной важной проблемой является выбор критериев сопоставимости различных элементов различных множеств. Более того, в большом количестве случаев могут выявиться противоречия между сопоставляемыми данными, причем они могут на первый взгляд просто взаимно исключать друг друга. Однако такое состояние предлагаемой схемы соответствует в общих чертах состоянию знаний во многих отраслях науки и техники. Это нормальный процесс установления новых, уточнения и опровержения старых представлений о поведении объекта (машин, узлов, механизмов, агрегатов и т.д.). В практике проектировщиков нередки случаи, когда конструкторы, исследователи с большим опытом работы по памяти устанавливают аналогии между элементами нового проекта, находящегося в разработке, с элементами своих или чужих проектов, выполненных гораздо раньше. Это находит в последующем подтверждение при сопоставлении моделей и результатов. Таким образом, предлагаемый подход является в некоторой степени схемой, действующей в практике проектирования: накопление данных, выявление аналогий и установление зависимостей.

Естественно, что данный подход требует особой организации соответствующих баз данных, поскольку количество учитываемых факторов, параметров, воздействий и взаимосвязей в механических системах чрезвычайно велико, даже если ограничиться отдельным классом объектов. Лавинообразного роста информации можно избежать, используя иерархические структуры ее хранения, основанные на различных типах классификаций исследуемых объектов: по форме, по составу, по типам внешних воздействий, по функциональному назначению и т.д. При этом можно устанавливать различные виды соответствия: внутри определенного класса, подкласса, подподкласса, а также между элементами разных классов, подклассов, подподклассов и т.д.

Формализация предложенного подхода может быть следующей. Пусть множество  $R$  – объединение элементов  $\bar{R}$ . Тогда множество параметров  $\bar{P} = \bigcup \bar{P}_i$ , то есть множество параметров  $\bar{P}$  является объединением множеств отдельных параметров отдельных представителей класса (для каждой из типов моделей  $R$ ,  $N$ ,  $M$ ,  $E$ ), и задача (5) записывается в виде

$$\overline{P}_N^* : I(\overline{P}, \overline{P}_N, \Delta u_{NE}) \leq \varepsilon . \quad (6)$$

*Для расширенного множества параметров*, исходя из идеи о формальной равноправности параметров  $P_E, P_N, P_M$ , можно формировать *расширенное обобщенное параметрическое пространство*, из которого можно выделять подпространства *варьируемых параметров, уточняемых параметров, критериальных параметров, ограничительных параметров*. При этом в процессе исследований все эти категории могут быть пересекающимися, перетекающими друг в друга. Тогда задача (5) записывается в виде

$$\overline{P}_V^* : I(\overline{P}, \overline{P}_V, \Delta u_{NE}) \leq \varepsilon , \quad (7)$$

где  $\overline{P}_V$  – множество варьируемых параметров.

*На случай динамического процесса* обобщение задачи на динамический процесс

$$P_N^*, f^* : I(t) \leq \varepsilon \quad (8)$$

предполагает формирование критерия, позволяющего распространить функционал на некоторый характерный интервал времени.

*На случай нелинейного процесса* предлагается формулировка

$$P_N^*, \tau^* : I(\tau) \leq \varepsilon , \quad (9)$$

где  $\tau$  – множество параметров, описывающих нелинейный процесс (например, параметры нагружения при упруго-пластическом деформировании).

*На случай резко возрастающих требований к вычислительным ресурсам* возникает проблема, если требование увеличения точности вступает в противоречие с существующими в распоряжении исследователя вычислительными ресурсами  $R_S$  (выступает в качестве штрафа: величина его резко возрастает при приближении к ограничению на имеющиеся ресурсы):

$$P_N^*, f^* : I(P_N, f) + R_S(P_N, f) \leq \varepsilon . \quad (10)$$

*На случай сравнения состояний объекта через большие промежутки времени* можно использовать идею хронологического «портретирования» (то есть серия «снимков» объекта через большие промежутки времени, а отсюда – определение или изменения самого объекта, или физико-механических характеристик материала). Происходит как бы «привязка» «рамба» (см. рис. 1) предлагаемого РЭМ к разделенным моментам времени. В данном случае

$$P_N^*, f^* : I(t_1, t_2, \dots, t_n) \leq \varepsilon . \quad (11)$$

Здесь  $t_1, t_2, \dots, t_n$  – моменты времени, при которых производится сравнение состояний объекта.

*Для формирования баз данных, знаний и экспертных систем на основе расчетно-экспериментальных исследований* во многих случаях самостоятельную ценность имеют не только и не столько экспериментально проверенные результаты численных исследований, но и рационально сбалансированная достоверная численная модель объекта.



Конечно-элементная модель сложного объекта может иметь также и большую коммерческую ценность. Кроме того, предложенная методика может быть положена в основу иерархической базы данных и знаний о том или ином классе объектов, причем объектами сравнения могут быть множества баз данных (как численных, так и экспериментальных). Здесь также могут быть введены соответствующие критерии улучшения модели, причем для сравнения могут быть взяты модели, полученные независимо из различных источников и в разное время.

Окончательным результатом исследования является достоверная численная модель для определения напряженно-деформированного состояния тех или иных объектов или классов объектов. При решении поставленной задачи при помощи предложенного расчетно-экспериментального метода ее можно обратить: пусть имеется достаточно точный инструмент исследования численных моделей, однако существует сомнение в применимости тех или иных математических моделей. То же – на любом участке цепи «математическая модель – численная модель – экспериментальная модель с измерительной аппаратурой». В этом случае можно: определить структуру и параметры той или иной модели (*узкая задача*); определить в пространстве варьируемых параметров области, в пределах которых справедливы различные модели (*широкая задача*).

Формально в процессе исследований можно «уравнять в правах» все типы моделей, выделив группу уточняющих моделей и уточняемую модель. Кроме того, возможна и постановка «смешанной» задачи, то есть задачи, в которой объектом уточнения является множество параметров, представляющее совокупность параметров из различных типов моделей. В этом случае вместо уточняющих и уточняемых моделей (и их параметров) в качестве основных объектов выступают соответственно подмножества параметров. Более того, состав этих множеств может изменяться за счет «миграции» параметров из группы в группу.

Предлагаемый метод изучения напряженно-деформированного состояния элементов сложных механических систем допускает глубокую степень формализации, однако большую роль в процессе исследований играет сам исследователь (или группа исследователей). В его компетенции – определение, изменение (удаление, пополнение) множества параметров, а также границ их изменения, разрешение коллизий, а также текущий контроль над процессом. Это обусловлено, во-первых, невозможностью на данном этапе полной формализации предлагаемой технологии исследований, во-вторых, необходимостью исключения тупиковых ситуаций и, в-третьих, очень высокой стоимостью ошибки (например, неоправданное усложнение плана экспериментальных исследований может повлечь такой рост общей стоимости всего комплекса исследований группы или класса конструкций, что он превысит стоимость аналогичных работ по традиционному способу).

Предложенные схемы расчетно-экспериментальных исследований позволяют оперативно проводить *серии* исследований групп конструкций, причем наиболее трудоемкая часть, а именно экспериментальная, проводится в минимально возможном объеме.

Используя преимущества INTERNET-технологий, исследования с применением предложенного расчетно-экспериментального метода можно, во-первых, распараллелить (то есть одновременно выполнять отдельные этапы и подэтапы силами различных исследователей и исследовательских групп), а, во-вторых, разнести географически и хронологически. При организации сервера баз данных возможна также определенная организация хранения результатов исследований, позволяющая создавать банки данных по тем или иным группам конструкций. Придав таким базам данных свойства открытости и доступности, на определенной стадии их развития можно создавать «верификационные эталоны» для различных видов механических систем. Это в свою очередь позволяет создавать экспертные системы, само существование которых избавило бы от необходимости проводить большую часть экспериментальных исследований, поскольку перед предстоящим циклом исследований всегда была бы возможность обратиться к соответствующей (и все время пополняемой) базе знаний. Чем полнее и совершеннее эта база, тем больше вероятность получить необходимые рекомендации для построения достоверной численной модели исследуемой механической системы.

Естественно, что при проведении расчетно-экспериментальных исследований в предложенной постановке одним из требований является некоторая степень *избыточности* экспериментальных данных, которая позволяет повысить степень точности и полноты создаваемой численной модели.

Таким образом, предложенный подход позволяет устранить существующие недостатки традиционной технологии расчетных и экспериментальных исследований напряженно-деформированного состояния элементов сложных механических систем, а именно формализовать процесс сравнения, автоматизировать процесс улучшения численной модели и повысить оперативность всего цикла исследований с привлечением современных информационных технологий, что дает возможность провести географическое и временное разделение процесса исследований.

## 5. Выводы

Предложена новая технология расчетно-экспериментального исследования элементов сложных механических систем, для которой характерны следующие особенности.

1. Предложенный расчетно-экспериментальный метод дает возможность организовывать самокорректирующийся процесс расчетно-экспериментальных исследований, основным результатом которого является достоверная расчетная параметрическая модель элементов сложных механических систем.

2. Предложенный расчетно-экспериментальный метод устраняет противоречие, следующее из линейного характера процесса исследований в традиционной их постановке.

3. Разработанная технология расчетно-экспериментальных исследований встраивается в цикл проектирования, исследования, технологической подготовки производства и изготовления современных сложных машиностроительных конструкций.

4. Предложена схема определения значимых факторов расчетных моделей элементов сложных механических систем по результатам экспериментальных исследований. Для изучения влияния конструктивных, технологических и эксплуатационных параметров на напряженно-деформированное состояние наиболее нагруженных и ответственных деталей ЭСМС предлагается производить комплекс экспериментальных исследований, в которых при варьировании условий определяется реакция исследуемого объекта. При этом представляется возможным построение сбалансированных расчетных моделей с необходимым уровнем детализации.

Применение предложенного подхода приводит к многократному сокращению сроков, стоимости исследований, дает сбалансированную модель для анализа и оптимизации конструкций элементов сложных механических систем. В дальнейшем необходимо разработать механизм сопряжения данной технологии исследований с современными CAD/CAM/CAE/PDM-системами, что позволит организовать замкнутые циклы «проектирование-исследование-изготовление» изделий с высокими техническими характеристиками на отечественных предприятиях.

**Список литературы:** 1. *Ткачук Н.А.* Расчетно-экспериментальное исследование напряженно-деформированного состояния элементов сложных механических систем // *Динамика и прочность машин*, 2002. – № 10, т. 2. – С. 126-131. 2. *Ткачук Н.А.* Интенсивная схема экспериментальных исследований элементов технологических систем // *Динамика и прочность машин*, 1998. – № 56. – С. 175-181. 3. *Капустин А.А., Ткачук Н.А.* Расчетно-экспериментальный метод исследования деформаций элементов механических систем // *Вестник ХГПУ*, 1999. – № 53. – С. 148-155. 4. *Ткачук Н.А., Гриценко Г.Д., Глуценко Э.В., Ткачук А.В.* Программно-аппаратный комплекс для анализа и синтеза моделей элементов сложных механических систем // *Динамика и прочность машин*, 2004. – № 31. – С. 154-165. 5. *Ткачук Н.А.* Экспериментальное определение характера граничных условий в сложных механических системах // *Механіка та машинобудування*, 2000. – №1. – С. 28-34. 6. *Гриценко Г.Д., Ткачук А.В., Ткачук Н.А.* Расчетно-экспериментальные параметрические модели для исследования напряженно-деформированного состояния элементов механических систем // *Вестник ХГПУ*, 2000. – № 101. – С. 78-85. 7. *Ткачук Н.А.* Расчетно-экспериментальные методы анализа напряженно-деформированного состояния элементов сложных механических систем на основе методов спекл-голографической интерферометрии и конечных элементов // *Вестник НТУ «ХПИ»*, Тем. выпуск «Технології в машинобудуванні», 2001. – № 7. – С. 243-247. 8. *Вест Ч.* Голографическая интерферометрия. – М: Мир, 1982. – 504 с.

*Поступила в редколлегию 25.04.2005*